



Essais préliminaires en vue de la conception de bobines inorganiques pour des moteurs haute température

Vadim Iosif

► To cite this version:

Vadim Iosif. Essais préliminaires en vue de la conception de bobines inorganiques pour des moteurs haute température. Journées JCGE'2014 - SEEDS, Jun 2014, Saint-Louis, France. hal-01083916

HAL Id: hal-01083916

<https://hal.science/hal-01083916>

Submitted on 18 Nov 2014

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

Essais préliminaires en vue de la conception de bobines inorganiques pour des moteurs haute température

Vadim IOSIF

Univ. Lille Nord de France, F-59000 Lille, France

UArtois, LSEE, F-62400 Bethune, France

iosifvadim@gmail.com

RESUME – La densité de puissance d'un actionneur électrique est limitée par trois paramètres: l'induction dans l'entrefer de la machine, la vitesse relative rotor/stator et la densité de courant dans les conducteurs actifs. Le moteur asynchrone est pris comme exemple pour montrer les avantages et les inconvénients de l'accroissement de la température interne des bobinages. Pour dépasser franchement les possibilités des matériaux organiques actuels utilisés pour isoler les fils de bobinage des moteurs électriques, un fil à isolation céramique est étudié de façon expérimentale. Les essais portent sur les courant fuite et le seuil d'apparition des décharges partielles à température ambiante et pour des températures élevées qui atteignent 500°C. Ces essais sont conduits sur plusieurs types d'échantillons dans le but de définir les limites d'utilisation de ce fil céramique pour construire une bobine intégrable dans un moteur électrique capable de fonctionner longtemps à une température interne de 500°C.

ABSTRACT – The power density of electric actuators is limited by three parameters: the flux density in the air gap, the relative speed rotor / stator and the current density in the active conductors. The induction motor is taken as an example for explaining the advantages and disadvantages of increasing the internal temperature of motor windings. In order to perform a real breakthrough toward high temperatures, it is necessary to avoid classical organic technologies bases on polymers, which are limited to more or less 300°C. A ceramic-coated wire is studied experimentally; tests based on the leakage current and partial discharge inception voltage measurements at room temperature and at elevated temperatures up to 500°C. These tests are conducted for several kinds of samples in order to define the limits of use of this ceramic-insulated wire for a future use in coils of an electric motor able to work a long time at an internal temperature of 500°C.

MOTS-CLES – Moteur électrique à forte densité de puissance, haute température interne, fil inorganique, courant de fuites, décharges électriques, rayon de courbure.

1. Introduction

Les actionneurs électriques occupent une place de plus en plus importante dans les transports terrestres, dans l'aéronautique et dans bien d'autres domaines; l'augmentation de la puissance massique est un challenge important dans le but d'assurer efficacement de plus en plus de fonctions dans ces équipements. La transformation électromécanique de l'énergie est limitée par trois paramètres physiques incontournables: l'induction dans l'entrefer, la vitesse de rotation et la densité de courant dans les conducteurs actifs. Les deux premières limites sont liées aux caractéristiques magnétiques des matériaux et à la qualité du guidage mécanique du rotor; la troisième dépend de l'équilibre thermique global de la machine. En dehors des solutions liées à l'utilisation des matériaux supraconducteurs, la densité de courant dans les conducteurs actifs est limitée par la température admissible par le système d'isolation électrique (SIE) et par l'efficacité de l'évacuation des pertes. Cette problématique générale est présentée pour le cas simple de la machine asynchrone; une solution inorganique capable de faire une percée importante vers les hautes températures (HT°) est ensuite présentée. Les caractéristiques électriques et mécaniques très différentes des matériaux inorganiques sont analysées afin de développer les connaissances utiles pour proposer des nouvelles méthodes de construction des machines capables de travailler à des températures internes très élevées atteignant 500°C. La solution à base de céramique proposée est encore très éloignée du niveau de maturité des SIE organiques actuels, il s'agit de cerner les principales limites à ne pas dépasser pour construire des bobines inorganiques HT° capables d'équiper des nouveaux actionneurs très compacts et à forte densité de puissance [1].

2. Influence de la température interne maximale sur la puissance massique

Les machines à forte densité de puissance sont souvent rapides donc assez longues avec un diamètre réduit, leur équilibre thermique peut être déterminé en considérant que toute la chaleur produite dans le rotor passe à travers le stator et la carcasse avant d'être évacuée à l'atmosphère par le système de ventilation. La Figure 1 illustre ce principe sur la coupe transversale d'une partie de la machine. La carcasse, souvent en aluminium, est moulée sous pression autour de l'acier magnétique du stator, la surface de contact entre les deux parties est importante et la pression est forte, le contact thermique est donc excellent; la carcasse et le stator peuvent être supposés isothermes. Le schéma de la Figure 1 est un modèle thermique simplifié qui permet d'estimer la température interne des principaux éléments de la machine: le rotor, le bobinage et la carcasse; ces éléments correspondent aux points R, B et C sur le schéma équivalent de la figure 2; le

point A correspond à la température ambiante supposée constante. Les sources de chaleur P_R , P_B et P_F représentent respectivement les pertes dans le rotor, dans les bobines et dans le fer du stator. Les résistances thermiques caractérisent les principaux échanges thermiques dans la machine en régime d'équilibre. Ainsi une petite partie des pertes du rotor sont évacuées directement par l'arbre (R_{RA}) l'autre doit traverser l'entrefer et s'évacuer à l'extérieur par le stator. Il existe également un couplage entre les bobines et le rotor (R_{RB}). Ce modèle thermique simplifié ne prend pas en compte les échanges complexes qui existent au niveau des têtes des bobines.

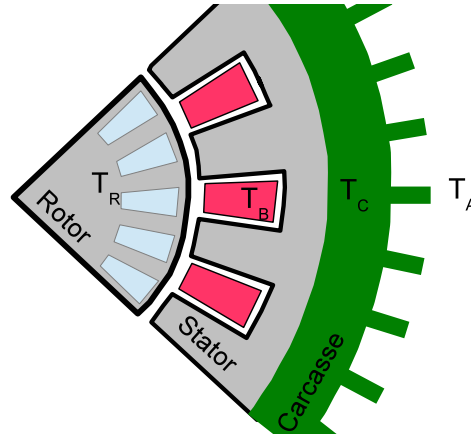


Figure 1: La section transversale de la partie active d'une machine.

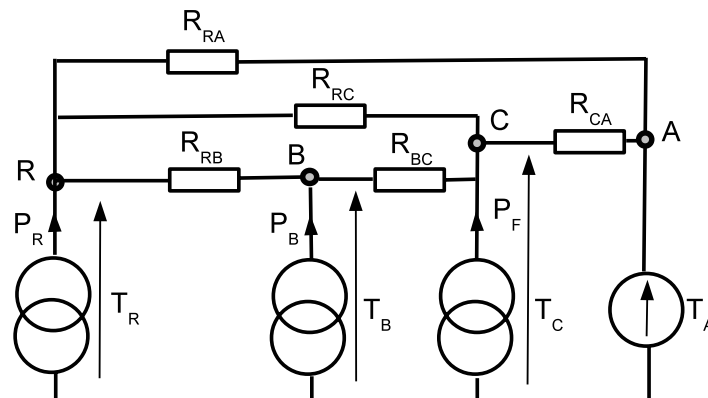


Figure 2. Circuit thermique équivalent.

Les barres du rotor ne sont pas isolées elles peuvent donc supporter des températures plus élevées que les conducteurs actifs du stator. Lorsque les machines sont isolées par des polymères dont qui ont des limites thermiques, le point critique pour le dimensionnement est la température des bobines T_B qui doit rester en permanence sous la valeur maximale qui dépend de la nature des isolants.

Le schéma équivalent classique de la machine asynchrone permet de calculer les pertes Joule, les pertes dans le fer et la puissance transmise au rotor. L'augmentation des résistances des enroulements en fonction de la température est prise en compte en appliquant la formule classique qui fait intervenir le coefficient de température α de chaque matériau

$$R(T_2) = R(T_1)[1 + \alpha(T_2 - T_1)]$$

Les courbes des figures 3 et 4 représentent les variations des pertes Joule, de la puissance transmise, des températures internes et des résistances en fonction du glissement qui est le principal paramètre qui caractérise la charge mécanique de la machine. Les paramètres du schéma équivalent et les résistances thermiques sont ceux d'une machine de construction classique dont la puissance nominale est de 11 kW; la température ambiante est fixée à 40°C.

Ces courbes montrent le fonctionnement classique d'une machine asynchrone; l'accroissement du glissement correspond a une augmentation du couple demandé par la charge mécanique et le moteur asynchrone répond en augmentant la puissance transmise au rotor. On observe évidemment que l'accroissement du glissement augmente les pertes joules donc les températures internes et par conséquent les résistances du stator et de la cage du rotor. Ces courbes montrent également que lorsque la température admissible dans le stator et dans le rotor est plus élevée, il est possible de travailler à un glissement plus important et donc de transmettre plus de puissance à la charge. L'augmentation importante des pertes limite cependant les bénéfices de ce processus.

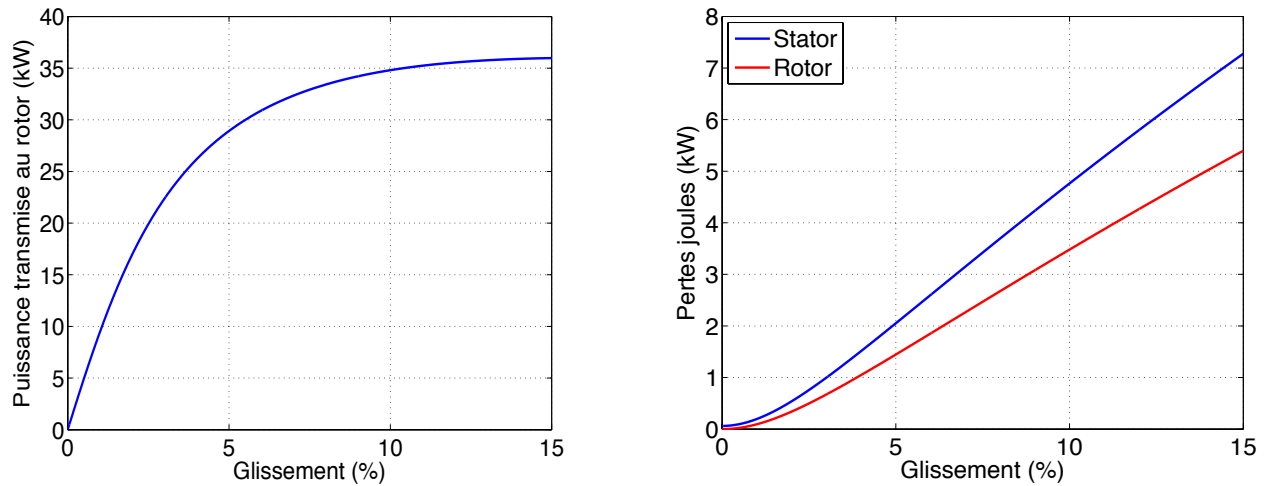


Figure 3: Puissance transmise au rotor et pertes en fonction du glissement.

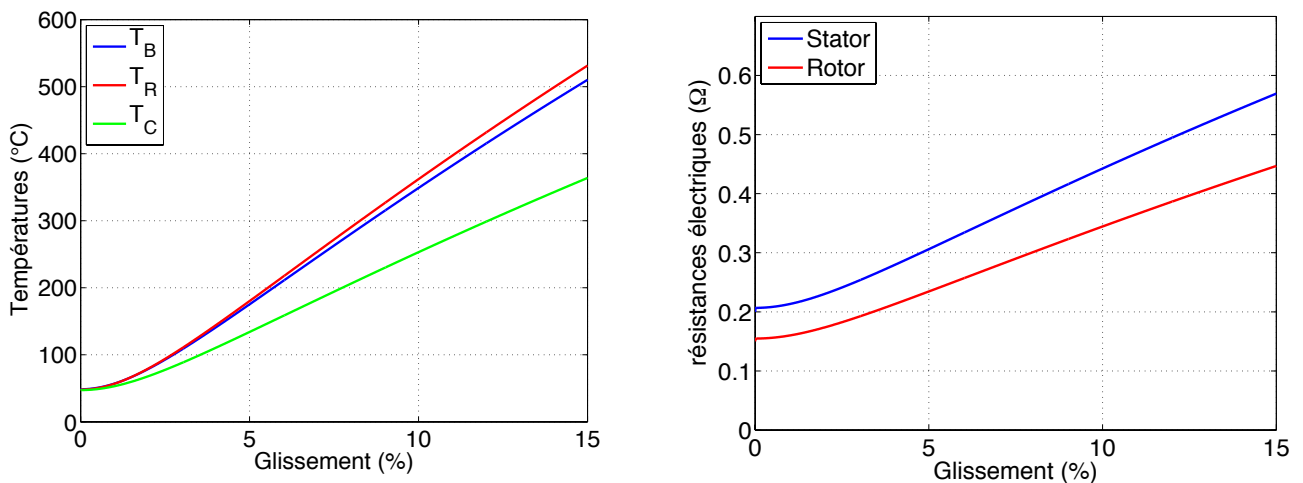


Figure 4: Températures et résistances en fonction de glissement.

3. Limite des Système d'Isolation Electrique (SIE).

3.1 Limite des fils organiques.

Les meilleurs fils émaillés organiques actuellement disponibles dans le commerce ont une classe thermique de 240°C. Rappelons que la classe thermique d'un fil émaillé organique correspond à la température maximale à laquelle il peut être soumis pendant 20000 heures avec un taux d'échec de 50% à un test de fin de vie consistant à appliquer une tension de 1000V /50Hz pendant une minute à une éprouvette torsadée normalisée. Cette définition fait abstraction des autres contraintes. La technologie organique est maintenant mature, elle bénéficie d'un retour d'expérience très important. Des avancées vers des classes thermiques plus élevées sont en cours grâce notamment à des fils fabriqués avec des polymères chargés de nanoparticules minérales qui résistent à des températures un peu supérieures. Dans le futur, il est possible d'envisager que les progrès des technologies des polymères nanochargés permettront d'atteindre une classe thermique de 300°C mais des percées technologiques vers des températures nettement supérieures sont hors de portée des technologies à base des polymères.

La figure 3 donne un exemple de fil de bobinage classique largement utilisé pour fabriquer les machines électriques. Le fil émaillé le plus classique est construit avec deux couches isolantes, celle qui est au contact du cuivre est un polymère de la famille des polyester-imides (PEI) modifiés au THEIC; la couche externe est en polyamide-imide (PAI) [2]. Les épaisseurs déposées sont définies par la norme la norme CEI 60317-0-1, elles dépendent du diamètre, l'ordre de grandeur est de 30 μm pour un fil de diamètre 1 mm [3].

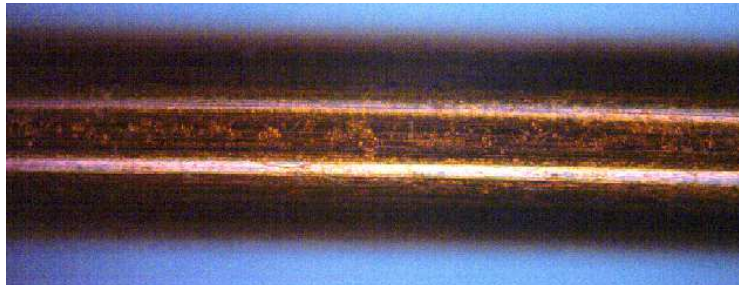


Figure 5. Fil classique de diamètre 0,85 mm.

3.2 Description d'un fil isolé par de la céramique

Le produit testé porte la référence Cerafil 500TM, le conducteur est isolé par une fine couche de céramique. Le conducteur central de cuivre est protégé de l'oxydation par une couche de nickel sur laquelle une couche de céramique assez mince est déposée. Ce produit est conçu pour réaliser des connections électriques dans des milieux où la température est très élevée mais la fragilité mécanique de la couche isolante ne permet pas son bobinage en utilisant les technologies actuelles de fabrication des machines électriques. La figure 6 présente une coupe transversale de ce fil est une vue de côté qui montre que la surface extérieure est assez irrégulière par rapport à celle du fil classique.

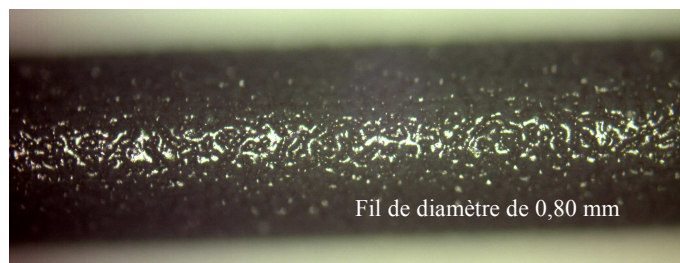
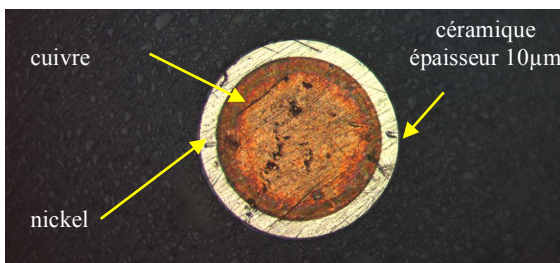


Figure 6. Fil isolé par une couche de céramique.

3.3 Courant de fuites

Les courants de fuites sont mesurés avec un circuit intégrateur réalisé avec un amplificateur opérationnel à très faible courant de fuites et un condensateur de haute qualité. La tension appliquée est rectangulaire, en très basse fréquence ($f=0,1\text{Hz}$) avec une amplitude de 15V. Avec cette faible amplitude, les effets liés aux décharges sont éliminés; ils seront évalués par un autre système de mesure. Cette méthode de mesure indirecte mesure en fait la vitesse de charge du condensateur ce qui permet d'éliminer les bruits et de mesurer des courants de fuites de l'ordre de quelques dizaines de pA. Le fil isolé est enroulé sur un tube en acier inoxydable, le courant de fuite est celui qui passe dans une couche de céramique située entre le cuivre nickelé et le tube en acier inoxydable. La figure 5 montre le montage mécanique utilisé, le poids du tube d'acier inoxydable permet de travailler avec une pression constante sur la couche isolante.



Figure 7: L'échantillon sur le tube de 50 mm pour la mesure du courant de fuite.

Les courants de fuites ont été mesurés en enroulant le fil isolé céramique sur des tubes de deux diamètres différents: 12mm et 50mm dans des conditions de laboratoire classique (température ambiante et humidité relative classique); les résultats sont présentés dans les tableaux 1 et 2.

Tableau 1. Fils céramique 0,5 mm bobiné sur un tube de 12 mm, un exemple pour deux échantillons.

diamètre du fil, mm	Paramètres de mesures	Nombre de mesure					
		1	2	3	4	5	6
0,5	I, (nA)	0,80	0,82	1,01	0,91	0,96	0,89
0,8	I (μA)	1,43	1,37	1,41	1,39	1,38	1,40

Tableau 2. Fils céramique 0,5 mm bobiné sur un tube de 50 mm, un exemple pour deux échantillons.

diamètre du fil, mm	Paramètres de mesures	Nombre de mesures					
		1	2	3	4	5	6
0,5	I (pA)	19,11	21,09	18,06	17,42	21,61	20,32
0,8	I (pA)	25,81	23,67	23,00	24,33	25,67	24,00

On observe que le courant de fuite devient important lorsque le fil isolé céramique est bobiné sur le tube 12 mm de diamètre, cette expérience correspond à un rayon de courbure de 6mm. Le courant de fuites est négligeable pour lorsque le rayon de courbure est de 25 mm. La première série de mesure montre également que les courants de fuites sont environ 1000 fois plus forts pour le fil de diamètre 0,8mm que pour le fil de diamètre 0,5 mm; ce rapport très important montre bien que la couche de céramique déposée sur le fil de diamètre 0,8 mm est quasiment détruite par l'opération de bobinage sur le tube de 6 mm de rayon.

3. 4 Mesure du courant de fuites entre les spires jointives

Les bobines sont faites sur le tube de diamètre de 50 mm pour éviter les éventuelles destructions d'isolation. Nous avons choisi pour ces tests d'utiliser des fils en céramique avec les diamètres de 0,5 mm et 0,8 mm. La largeur de la bobine est fixée à 4 mm ce qui permet de mettre 5 tours d'un fil de diamètre 0,8 mm et 8 d'un fil de 0,5 mm. Les tubes ont été mis entre deux plaques métalliques. Toutes les parties métalliques en contact des bobines ont été isolées avec du mica, comme le montre la coupe transversale de la figure 8. Pour pouvoir mesurer le courant de fuites entre deux fils côte à côte, une première couche est déposée avec un fil et au dessus une seconde couche est réalisée avec un second fil. Les résultats sont présentés dans le tableau 3.



Figure 8: Bobine double couche faite avec du fil à isolation céramique.

Tableau 3. Bobine avec fil à isolation céramique (Ø 0,5 mm et 0,8 mm)

diamètre du fil, mm	Paramètres de mesures	numéro des mesures					
		1	2	3	4	5	6
0,5	I, (pA)	25,00	22,00	34,67	15,67	35,00	16,67
0,8	I, (pA)	75,20	77,71	75,51	77,71	81,47	78,65

On mesure des courants de fuites très faibles, inférieurs à 100 pA; les courants de fuite sont cependant plus importants pour un fil 0,8 mm. Il est difficile de conclure sur les différences constatées pour des courants aussi faibles. La conclusion majeure de cette mesure reste la constatation d'une résistance supérieure à 150 GΩ 'compte tenu des pressions appliquées à la couche isolante. Cela est amplement suffisant pour réaliser le bobinage d'une machine électrique.

4. Limite sur la tension inter-spires

4. 1. Phénomènes de décharges

Le champ électrique dépend de la différence de potentiel appliquée entre les spires de la géométrie et de la permittivité relative de la couche isolante en céramique. L'approche est expérimentale car les phénomènes physiques sont complexes. La complexité de l'interprétation des phénomènes observés est liée à deux éléments:

- la surface externe de la céramique n'est pas régulière, il y a donc des variations locales importantes du champ électrique dans l'air au voisinage de la surface du fil isolé;
- très peu d'informations sont communiquées par le constructeur du fil sur la nature exacte sur la nature de la céramique utilisée ainsi que sur la densité obtenue lors du frittage de la couche isolante.

L'observation à l'échelle macroscopique des phénomènes a pour but de définir la tension inter-spires maximale qu'il est possible de retenir pour concevoir les bobines inorganiques capables d'équiper un moteur haute température.

4. 2. Mesures des décharges

Le système défini à la figure 9 est utilisé pour mesurer les décharges. Le générateur basse fréquence fournit un signal sinusoïdal à 10 kHz à l'amplificateur linéaire qui alimente le primaire du transformateur élévateur. Le système est capable de fournir une tension sinusoïdale réglable jusqu'à 1000 V_{eff}.

L'armoire métallique permet de réduire le bruit électromagnétique susceptible de perturber la mesure des impulsions rapides. Le transformateur élévateur et le filtre passe bas sont placés à l'intérieur de l'armoire métallique; le filtre bas permet d'éviter le risque de transmission des décharges partielles qui pourraient exister dans le circuit d'alimentation extérieur. Le condensateur de couplage C_k permet de fermer le circuit électrique où le courant créé par la DP circule. Ce circuit comporte un shunt non inductif R_{sh} qui permet la mesure du courant. Le dispositif de couplage permet de d'éliminer la composante alternative venant du générateur à cause du couplage capacitif. La tension du générateur basse fréquence est amplifiée par un amplificateur de puissance qui alimente le transformateur élévateur. La fréquence de la tension a été fixée à 10 kHz.

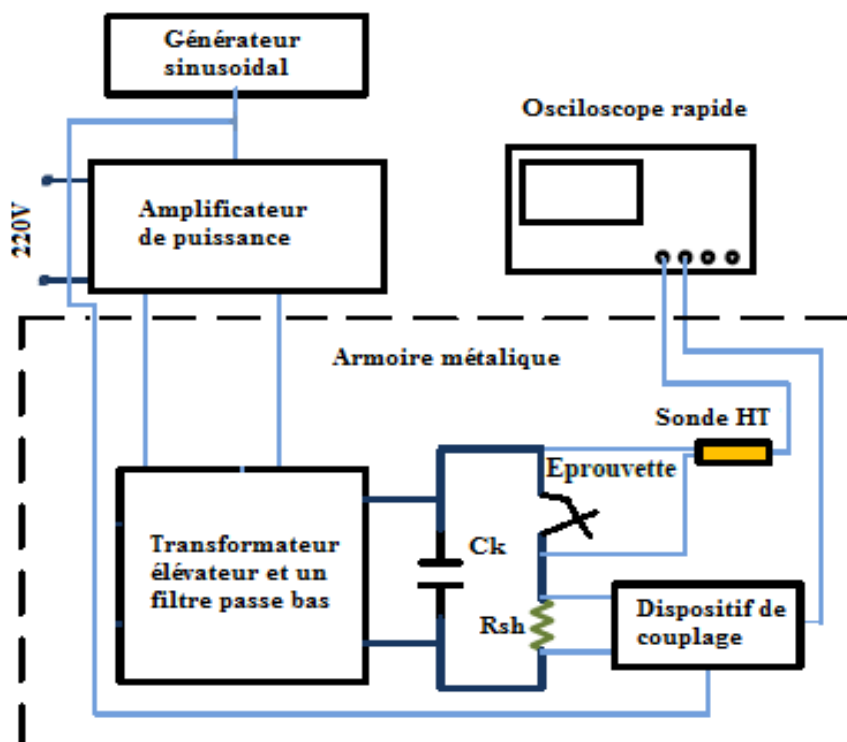


Figure 9: Schéma électrique pour les essais DP.



Figure 10: Vue d'ensemble du système de mesure.

Chaque échantillon est constitué de deux fils posés l'un sur l'autre avec un angle voisin de 90° sur un support isolant (figure 11), la zone testée est donc quasiment ponctuelle. Une première mesure a été faite avec du fil organique classique pour tester le système de mesure et fournir un point de comparaison aux mesures faites sur le fil inorganique. Trois diamètres ont été utilisés 0,3, 0,5 et 0,85 mm pour le fil organique et 0,3, 0,5 et 0,8 mm pour le fil isolé par de la céramique. Les essais sont effectués à température et pression ambiante. Pour chaque paires le fil supérieur est déplacé pour obtenir 12 mesures sur des points de contacts différents. Les paramètres de chaque fil sont détaillés dans le tableau 4.



Figure 11: Vue générale, deux fils perpendiculaires (croisée).

Tableau 4. Fils testés.

Type de fil	Diamètre sans isolant (mm)	diamètre avec isolant (mm)	épaisseur de l'isolation (μm)
Émaillées (PEI-PAI)	0,30	0,350	25
	0,50	0,566	33
	0,85	0,928	40
Céramiques (Cerafil 500)	0,30	0,318	9
	0,50	0,518	9
	0,80	0,820	10

On constate que l'épaisseur de l'isolation pour les fils céramiques est beaucoup plus mince en comparaison des fils émaillés organiques.

4. 3. Résultats.

Essais à température ambiante

L'augmentation de la tension appliquée aux échantillons est contrôlée manuellement avec le générateur alors que le seuil de déclenchement de l'oscilloscope est réglé à un niveau légèrement supérieur au bruit du système de mesure. Le seuil d'apparition des décharges est relevé sur la seconde voie de l'oscilloscope qui visualise la tension appliquée dès que la décharge est détectée. Un exemple d'impulsion de décharge mesurée sur un échantillon est donné à la figure 12. La forme des impulsions de courant relevé avec des éprouvettes organiques est relativement proche ce celles obtenues avec les inorganiques. Ces impulsions sont caractérisées par la charge apparente (q_{ap}) qui représente la surface sous la courbe du courant mesuré. La charge apparente obtenue pour quelques éprouvettes de différents diamètres est donnée dans le tableau 5. La courbe de la figure 12 et les charges du tableau 5 sont relevées pour une tension légèrement supérieure au seuil d'apparition des décharges.

Tableau 5. Valeurs de q_{ap} pour différents fils émaillés et céramiques.

Fils croisés	Diamètre (mm)	Charge apparente (pC)
émaillés	0,30	0,39
	0,50	0,83
	0,85	0,45
céramiques	0,30	0,37
	0,50	0,34
	0,80	0,52

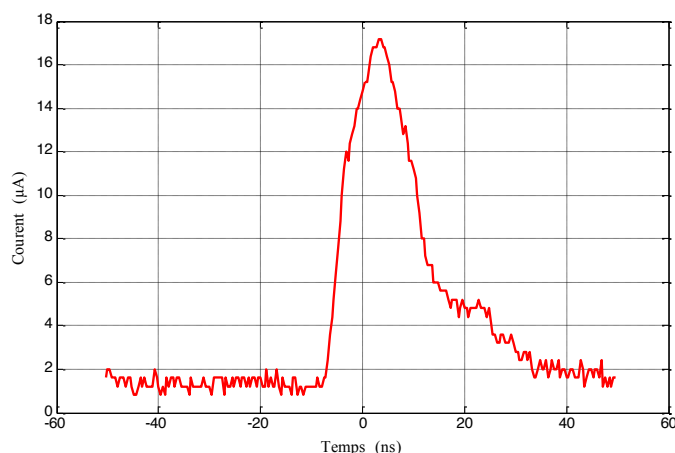


Figure 12: Courbe d'une impulsion de décharge mesurée sur un échantillon des fils émaillés croisés de diamètre 0,5 mm.

Le tableau 6 résume les valeurs moyennes de la tension d'apparition des décharges pour les différents essais réalisés. Ces résultats sont des moyennes obtenues avec 12 éprouvettes en prenant 12 points de contact sur chaque éprouvette soit 144 mesures. Les valeurs obtenues avec du fil émaillé sont de l'ordre de grandeur de celles trouvées dans la littérature scientifique avec des éprouvettes torsadées. Les seuils deviennent nettement plus faibles pour les fils inorganiques, ils ne sont que de l'ordre de 300V et ils semblent moins dépendre du diamètre du fil. Dans les deux cas, les écarts types relativement faibles attestent d'une bonne répétitivité des mesures.

Tableau 6. Essais à température ambiante.

Type de fil	émaillés			céramiques		
Diamètre, (mm)	0,3	0,5	0,85	0,3	0,5	0,8
Tension efficace limite, (V)	630	645	715	298	324	358
Ecart-type δ , (V)	38	31	18	2	4	7

Essais à température élevée.

Les mêmes essais ont été effectués dans un four avec des fils inorganiques de diamètres 0,5 et 0,8 mm. La liaison avec l'armoire métallique de mesure est faite par un câble haute température isolé par des couches épaisses de fibre de verre qui ne subissent pas de DP aux tensions appliquées. Les mesures sont réalisées sur des échantillons où le point de contact est stabilisé par une petite masse de 30g. À température ambiante, les seuils d'apparition des décharges sont identiques à ceux du tableau 6.

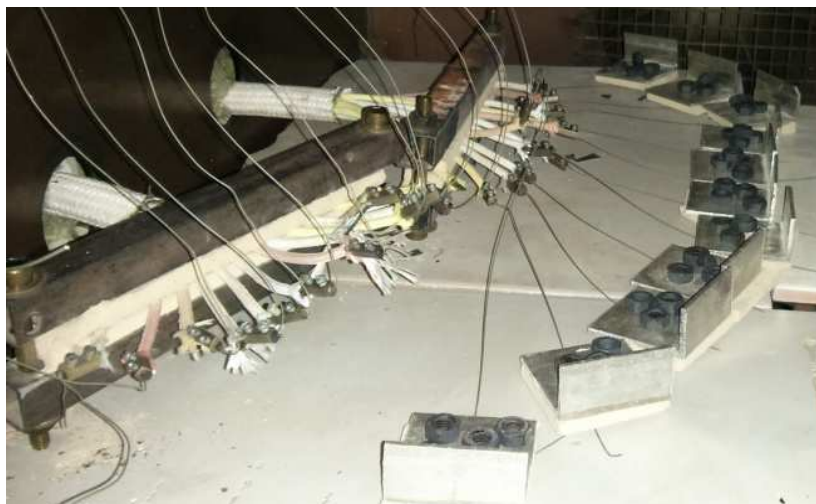


Figure 13: Essais en haute température (HT°).

Les charges apparentes sont relevées à 400, 450 et 500°C dans le tableau 7. Mis à part la valeur de 2,8 pC relevée à 450°C sur du fil de diamètre 0,8, la charge apparente est du même ordre de grandeur qu'à température ambiante. La valeur atypique mesurée reste cependant très inférieure à celle définissant le niveau de bruit acceptable dans la norme s'appliquant à tous les appareils du commerce utilisés pour mesurer les DP dans les machines électriques.

Tableau 7. Valeurs de q_{ap} pour suivants fils émaillés et céramiques en fonction de la température.

Fils croisés	Température (°C)	Diamètre (mm)	charge apparente (pC)
céramiques	400	0,50	0,392
		0,50	0,428
		0,80	0,324
	450	0,50	0,403
		0,80	2,837
	500	0,50	0,474

Les seuils sont mesurés en fonction de la température jusque 500°C et les résultats sont donnés dans le tableau 8. Ces essais montrent des seuils d'apparition des décharges plus faibles aux températures élevées.

Tableau 8. Essais à haute température.

Type de fil	céramiques									
Temperature (°C)	19-21		200		400		450		500	
Diamètre (mm)	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8	0,5	0,8
Tension efficace limite (V)	335	360	289	291	268	222	261	220	269	245

4. 4. Essais en haute température de bobines imprégnées.

Les essais précédents sur des fils en croix dans l'air doivent être complétés par des essais d'imprégnation car les bobines des moteurs HT° devront forcément être imprégnées dans un matériau supportant les températures élevées. Les essais ont été conduits avec une résine HT° commercialisé sous la référence Duralco 215. Les bobines définies à la figure 8 sont imprégnées manuellement mais avec soin avec la résine HT°. La figure 14 montre le résultat de cette réalisation.

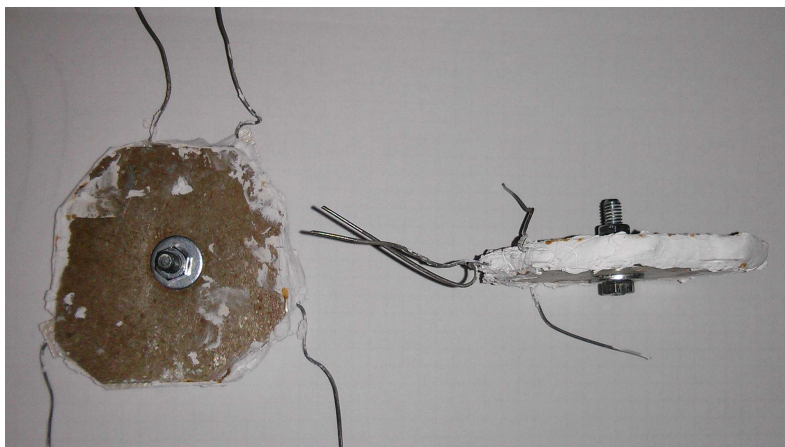


Figure 14: Bobine avec le fil céramique imprégné en céramique le type Duralco 215.

Les mesures du seuil d'apparition des décharges sont relevées en faisant une mesure entre les deux couches jointives du bobinage avec le même équipement. Les résultats sont présentés au tableau 9. La valeur moyenne du seuil est un peu plus élevée pour les bobines imprégnées. L'amélioration n'est cependant que de quelques dizaines de volts.

Tableau 9. Essais à haute température.

Conditions de température	Valeur mesurée	Le nombre de bobine				Valeurs moyennes, V
		1	2	3	4	
Température ambiante 20 °C	Tension efficace limite, (V)	391	399	398	400	397
Haute température 400 °C		285	299	302	307	298

6. Conclusion.

Ces travaux, essentiellement expérimentaux permettent de cerner les possibilités de réaliser des bobines inorganiques haute température avec du fil isolé par une fine couche de céramique. Les essais ont été conduits jusque 500°C. Ces résultats montrent que les règles usuelles de conceptions des machines électriques ne peuvent pas s'appliquer en l'état car la couche de céramique isolant le fil est très dure et donc fragile. Le rayon de courbure doit être adapté afin de conserver l'intégrité de la couche isolante. La valeur maximale de la tension inter-spires est également beaucoup plus basse que celle classiquement admises pour les fils organiques classiques.

Les fils inorganiques ont donc des propriétés mécaniques et électriques très inférieures aux fils émaillés classiques basés sur des polymères. Ces essais montrent cependant que, avec une conception bien adaptée il est possible de construire des bobines inorganiques rigides qui conviendront pour fabriquer des actionneurs capables de fonctionner à une température interne de l'ordre de 500°C. La prochaine étape du travail consiste à réaliser une telle bobine ordonnée rigide de la taille d'une dent statorique d'une machine à plots.

7. Remerciements

Ces travaux ont été réalisés dans le cadre du projet Actionneur électrique Compact avec Convertisseur Intégré pour Températures Extrêmes (ACCITE) financé par la Fondation de Recherche pour l'Aéronautique et l'espace (FRAE).

8. Références

- [1] G. C. Stone, E. A. Boulter, I. Culbert, H. Dhirani, "Electrical insulation for rotating machines", ed. 1: Wiley, 2004.
- [2] Fil de cuivre émaillé W 210, documentation technique du constructeur "SYNFLEX" <http://www.synflex.com>.
- [3] CEI 60317-0-1 - Spécifications pour types particuliers de fils de bobinage. Partie 0-1: Exigences générales - Fil de section circulaire en cuivre émaillé", ed. 2008.